

MP27– Systèmes bouclés

31 mai 2021

Clément Gidel & Pascal Wang

Bibliographie

↗ <i>Electronique expérimentale</i> , Krob	→ Pont de Wien
↗ <i>Expériences d'électronique</i> , Duffait	→ Asservissement du moteur
↗ <i>Précis Bréal Electronique PSI</i>	→
↗ ,	→

Table des matières

1 Oscillateur auto-entretenu : oscillateur de Wien	3
1.1 Etude en boucle ouverte	3
1.2 Condition d'oscillations du système bouclé	4
1.3 Naissance des oscillations (optionnel)	4
1.4 Effet des non-linéarités (optionnel)	5
2 Asservissement en position d'une MCC	5
2.1 Rapidité	6

Jury

- **2014-2017** : Ce montage concerne la physique des asservissements et/ou celle des oscillateurs auto-entretenus. Une maîtrise minimale des montages élémentaires est requise. Un oscillateur à quartz serait le bienvenu, compte tenu de son fort facteur de qualité.
- **2012** : Les notions de stabilité, puis de temps de réponse et de précision sont essentielles dans ce montage. Le monde moderne regorge de systèmes asservis évitant l'utilisation de « boîtes noires » présentant des défauts introduits exprès pour qu'on les corrige par asservissement. Le produit « gain \times bande passante = constante » ne doit pas être attendu aveuglément, les conditions de validité de cette relation doivent être connues et respectées.

Rapport : Valentin G

Intro : Présentation des systèmes bouclés, idée physique, schéma classique, diagramme de Nyquist pas obligatoire à mon avis. On peut mentionner des applications des systèmes bouclés. La condition de Barkhausen est à mentionner car on s'en sert souvent, insister physiquement ce que ça veut dire (dans ce cas Nyquist est utile).

I) Diagramme de Bode du filtre de Wien. Si on veut montrer la résonance, ça peut être bien de balayer un peu toutes les fréquences pour montrer que les signaux sont en phase, éventuellement en mode lissajou. On trouve $\omega_0 = 942 \pm 45 \text{ rad/s}$ et le facteur de qualité via la bande passante $Q = 0.3 \pm 0.01$. L'incertitude est reliée à l'imprécision de lecture sur Regressi (Pq si grosse incertitude sur pulsation propre?). On mentionne qu'on a un système stable si on a pas un gain assez élevé mais nous on veut une "légère" instabilité. Comment mesurer précisément le gain (mesure à l'oscillo)? On estime grossièrement la plage de résistance sur laquelle le gain total vaut 1.

Maintenant on boucle le système donc on vire le B+GBF. **Ca ne marche pas, pas d'oscillation, on ne comprend pas pq...** On le refait pdt les questions et ça marche. Commentaire du détecteur de crête.

2) Oscillateur à quartz. Le facteur de qualité est très important, il faut tatonner au niveau du hertz ou de la centaine de hertz pour s'approcher efficacement de la pulsation de résonance. On mesure la pulsation de résonance et du facteur de qualité via la bande passante. Précision sur la mesure? Légétime de lire tous les chiffres du GBF? On doit s'arrêter à un certain digit (typiquement 3) après on est plus significatif. On trouve une bande passante de 50 Hz!!!!

Système plus stable en fréquence? On rajoute un câble qui a une capacité d'environ 100 pF (d'où ça sort, et on pourrait pas faire varier tout ça??), on peut faire une TF quand on branche le câble dessus et le pic du fondamental n'est quasiment pas modifié.

II) Asservissement? On montre qualitativement l'asservissement. Avec un signal créneau comme avec l'énoncé, On mesure le dépassement aux curseurs. On en déduit le taux d'amortissement $m = 0.33$.

Plan : Clément

On fait le même plan que Pascal

A faire

Matériel

Pont de Wien

- GBF
- Résistances 1.5, 3x 1 kOhm
- Condensateurs 2x 1 uF
- Multimètres
- Oscilloscope
- Boîte à décade (résistance)
- AO

Moteur asservi

- P95.16/2 MCC
- Module Hameg
- Ampli HSA 4005
- 2x AO
- Résistances 3x 100,10 kOhm
- Boîte à décade (résistance)

Préparation

Introduction

Les systèmes bouclés sont tout autant présents dans la nature (fonctions de régulation du sang, de l'oxygène, ... du corps humain, maintien de l'équilibre, ...) que dans nos outils quotidiens (régulateur de vitesse, chauffage, chasse d'eau, ...). Commençons par définir ce qu'est un système bouclé : on appelle système bouclé un système qui va comporter une boucle de rétroaction, c'est-à-dire dont la valeur en sortie du système va être réinjecté en entrée. Le schéma-bloc ci-dessous éclaire ce principe.

On peut distinguer deux types principaux de systèmes bouclés : les oscillateurs rétroaction positive), qui vont répéter périodiquement un même signal, et les asservissements (rétroaction négative), qui se serviront de la boucle retour pour faire tendre la valeur de sortie vers une valeur souhaitée.

L'objectif de ce montage est de présenter quelques notions importantes sur les systèmes bouclés, et notamment les différents critères qui permettent de prévoir leur stabilité, les caractéristiques qui leur sont propres ainsi que certains moyens de les améliorer ou de les corriger.

1 Oscillateur auto-entrenu : oscillateur de Wien

➤ Krob p119, Précis Bréal On s'intéresse à des oscillateurs auto-entretenus : générateurs délivrant un signal périodique tout en étant alimenté par une source d'énergie continue, et en l'absence de tout signal périodique extérieur. L'oscillateur à pont de Wien est un oscillateur quasi-sinusoïdal : les signaux créés sont très proches de signaux sinusoïdaux.

Boucle de retour : filtre passe-bas d'ordre 1 : $B = \frac{1}{Q + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}$ Boucle directe : $A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$.

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (1)$$

Facteur de qualité : $Q = 1/3$

Choix des composants : R et C peuvent être choisis à peu près n'importe comment, du moment qu'ils ne diffèrent pas de plus de 1% d'un composant à l'autre et en gardant néanmoins à l'esprit que c'est eux qui vont fixer la fréquence de résonance du filtre (qui ne doit être supérieure à 10 kHz, nous la prendrons ici égale à 150 Hz environ, à cause de l'AO). On choisit $R = 1 \text{ k}\Omega$ et $C = 1 \mu\text{F}$. R_1 et R_2 doivent être pris du même ordre de grandeur et puisque R_2 doit être variable, il est commode de choisir une boîte à décade pour celle-ci et on choisit donc $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$.

1.1 Etude en boucle ouverte

Intérêt de l'étude en boucle ouverte : Le critère de Barkhausen indique si le système en boucle fermée est stable ou non en fonction de l'étude en boucle ouverte, c'est ce que nous allons mettre en évidence.

Etude du pont de Wien en boucle ouverte

Alimenter le circuit sous tension sinusoïdale d'amplitude 2V. Mettre en évidence le comportement passe-bande en montrant que le signal de sortie s'annule à haute et basse fréquence. Pour $R_2 = 1.5 \text{ k}\Omega$, mesurer les tensions s, e et le déphasage ϕ pour des fréquences allant de 1 Hz à 100 kHz. Tracer le diagramme de Bode en gain et en phase. Sur le diagramme de phase, déterminer ω_0 à l'annulation de la phase. Sur le diagramme de gain, vérifier les pentes

à +20 et -20 dB/décade et déterminer la bande passante à -3 dB. En déduire le facteur de qualité Q . Comparer ω_0 et Q à leurs valeurs attendues.

Diagrammes de Bode complémentaires (en préparation, pas la peine si on fait pas Nyquist)

Faire de même avec $R_2 = 2.5 \text{ k}\Omega$, $2 \text{ k}\Omega$.

Diagramme de phase un peu foireux, moi je le passerai. De plus on doit mesurer la résistance R_1 à l'ohmètre aussi car la boîte à décades est aussi mesurée à l'ohmètre.

1.2 Condition d'oscillations du système bouclé

Le critère de Barkhausen donne une condition pour obtenir un signal sinusoïdal : $AB = 1$, ce qui correspond à faire diverger le gain et ainsi permettre l'apparition d'oscillations à partir du bruit électronique, le système étant instable. Valable en phase et en argument, ce qui donne deux équations :

$$R_2 = 2R_1 \quad (2)$$

$$\omega = \omega_0 \quad (3)$$

La première impose que les oscillations ne sont possibles que si la chaîne directe amplifie suffisamment le signal pour avoir un gain de 1. En pratique, cette condition est nécessaire pour que les oscillations naissent mais n'est pas suffisante pour qu'elles se maintiennent ; on retiendra que pour qu'elles s'établissent durablement il faut : $R_2 > 2R_1$.

La deuxième condition stipule que les oscillations qui s'établissent dans le système bouclé sont les oscillations du régime libre de la chaîne de retour, elles ont donc une fréquence égale à la fréquence de résonance du filtre passe-bande. On peut vérifier expérimentalement ces deux conditions.

Vérification expérimentale des conditions d'oscillations

Enlever le GBF du circuit et boucler la sortie sur l'entrée.

Condition 1 : Pour $R_2 < 2 \text{ k}\Omega$, constater que les oscillations peinent à s'établir, puis augmenter R_2 jusqu'à ce qu'elles se maintiennent. Déterminer un encadrement à l'ohm près de la valeur de la résistance critique qui correspond à la condition d'oscillation. Mesurer les valeurs de R_c^+ et R_c^- à l'ohmmètre en les sortant du circuit. En déduire $R_c = (R_c^+ + R_c^-)/2$. Comparer à la valeur attendue $R_c = 2R_1$ (la valeur attendue a elle aussi une incertitude qui provient de la mesure de R_1 à l'ohmmètre).

Condition 2 : Pour une valeur de R_2 supérieure à R_c , visualiser les oscillations à l'oscilloscope. On peut alors soit directement mesurer la fréquence au fréquence-mètre, soit la déduire d'une mesure de période à l'aide des curseurs sur l'oscilloscope. Dans le premier cas l'incertitude est celle du fréquence-mètre, dans l'autre elle est dominée par l'incertitude sur le positionnement des curseurs.

Une autre manière de formuler la condition d'oscillation consiste à utiliser le critère d'instabilité de Nyquist, comme cela a été évoqué précédemment.

Diagrammes de Nyquist (optionnel)

À partir des données obtenues pour les diagrammes de Bode, calculer la partie réelle ($G\cos(\phi)$, $G = v_s/v_e$) et la partie imaginaire ($G\sin(\phi)$) de la fonction de transfert et tracer le diagramme de Nyquist, c'est-à-dire la partie imaginaire en fonction de la partie réelle. On doit obtenir un cercle dans les deux cas, et dans le second cas, la courbe doit entourer le point (1,0), signe de l'instabilité et donc des oscillations. On regarde les deux diagrammes de Nyquist ; si le diagramme englobe le point (1,0), le système est instable. Ici la valeur critique est atteinte pour $R_2 = 2R_1$, on a alors des oscillations auto-entretenues.

1.3 Naissance des oscillations (optionnel)

↪ Krob pp132-133

Equation régissant la dynamique du démarrage des oscillations donnée en bas de la p132 du Krob. Dans le cas où $1 - \frac{R_2}{2R_1} < 0$ i.e. $R_2 > 2R_1$, on a l'équation (5.14) p133 qui donne $e(t)=s(t)$.

Croissance des oscillations

⚡ Krob

Après avoir introduit le détecteur de crête en sortie du montage, faire une acquisition de la croissance des oscillations sous Latis-Pro. Pour cela, court-circuiter R_2 avec un fil, régler le seuil de déclenchement à 10 mV avec un pré-trig à 0% et ôter le court circuit après avoir lancé l'acquisition. Cela revient à introduire instantanément R_2 dans le circuit et donne un signal plus propre. Faire une modélisation affine de $\ln(s(t))$ et comparer la pente $\alpha\omega_0$. Répéter ceci pour plusieurs valeurs de $R_2 > 2R_1$ et tracer α en fonction de R_2 . Comparer la pente de la droite obtenue à $\frac{1}{2R_2}$.

On peut faire le portrait de phase mais bon pas incroyable de voir ce qu'il apporte.

1.4 Effet des non-linéarités (optionnel)**Distorsion (optionnel)**

Réaliser l'acquisition de la croissance des oscillations sous Latis-Pro pour $R_2 = 2.1 \text{ k}\Omega$. Lisser puis dériver le signal et tracer le portrait de phase.

Répéter l'opération pour une valeur de R_2 plus élevée (2.5 k Ω typiquement ; pas besoin de monter trop haut pour obtenir des non linéarités) et constater que l'apparition de non linéarités induites par la saturation de l'AO déforme le portrait de phase (ceci est aussi visible directement sur le signal de sortie à l'oscilloscope). Réaliser la FFT du signal pour cette grande valeur de R_2 : observer l'anharmonicité du signal.

L'anharmonicité du signal est due à la saturation de l'AO d'une part, mais aussi au fait que le filtre passe-bande de l'oscillateur de Wien possède un faible facteur de qualité, ce qui le rend peu sélectif et fournit un signal faiblement monochromatique.

On peut tenter de mesurer les amplitudes des autres harmoniques et de calculer un taux de distorsion $E = \sum_{n \neq 0} A_n / \sum A_n$. On trouve $E = (0.05 + 0.038 + 2 * 0.18 + 0.007 + 0.005 + 0.003) / 3 = 4.6\%$. L'incertitude associée est liée aux curseurs. On a pris une résistance de 2040 Ohm.

Un autre inconvénient de l'oscillateur de Wien, en dehors de son faible facteur de qualité, est son impossibilité d'obtenir des oscillations haute fréquence en raison du faible produit gain \times bande passante de l'AO. Voyons donc un oscillateur plus sélectif et à plus haute fréquence : l'oscillateur à quartz. On a vu comment le bouclage d'un filtre à un amplificateur pouvait créer des oscillations au-delà d'un certain seuil d'instabilité, et que ces oscillations sont d'autant plus pures spectralement que le filtre est sélectif. Voyons maintenant la fonction régulatrice du bouclage, i.e. ce qu'il se passe avec une rétroaction négative, c'est-à-dire lorsqu'on veut non plus déstabiliser le système mais au contraire stabiliser sa sortie autour d'une consigne imposée.

2 Asservissement en position d'une MCC

⚡ Duffait pp328-339

Choix des composants R doit être pris grand devant les impédances de sortie du potentiomètre (1 k Ω) et du GBF (50 Ω). On prend $R = 100 \text{ k}\Omega$. R_1 doit être grand devant l'impédance de sortie de l'AO (50 Ω) : on prend $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$.

Mise en marche (en préparation)

Brancher directement le GBF à l'entrée vm du moteur P95.16 (ne rien mettre sur les entrées +15 V/-15 V et vout pour l'instant), et envoyer 2 V continu. Le moteur se met à tourner. Augmenter la tension : le moteur tourne plus vite. Changer le signe de la tension : le moteur tourne dans l'autre sens.

Réaliser le montage identique à celui de Duffait en remplaçant le dernier AO par un amplificateur de puissance HSA. Sélectionner « Input A », régler le gain sur x10 (c'est le minimum), Zin sur 600 Ω et BIAS sur OFF. Prendre $R = 100 \text{ k}\Omega$, $R = 10 \text{ k}\Omega$, et utiliser une boîte à décade pour $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$.

Brancher vm sur le moteur. Pour cela, relier la sortie Output de l'amplificateur à la masse du moteur, et la masse de l'amplificateur sur l'entrée vm du moteur afin d'avoir un gain de -10 pour l'amplificateur. Mettre vr à la masse pour l'instant, et appliquer avec un GBF une tension 1 V continue sur ve. Le moteur doit tourner.

Avec une alimentation +15/-15 V (module Hameg), alimenter le potentiomètre en +15/-15 V. ATTENTION, la masse de l'alimentation doit être reliée à celles des AO, mais pas à celle du boîtier du moteur (pour éviter un court-circuit). Par pont diviseur de tension, on a alors vout compris entre +5/-5 V (à cause des deux résistances de

part et d'autre du potentiomètre). Relier vr et vout.

Remarque : Pour l'alimentation, utiliser P.53.19 petit boîtier blanc. En pratique on avait la position de la vis qui ne bouge quasiment pas en fonction de la consigne, peut être que le moteur P95.16 1 ne marche pas?? Un test utile est de voir si la tension de la contre réaction augmente lorsqu'on tourne dans le sens associé à une tension d'entrée positive. Attention à bien brancher le moteur à l'envers de tel sorte qu'on réinverse le signe de la tension à cause de l'amplificateur inverseur.

Pour la réponse dynamique, ça a l'air de bien marcher, sur Latis Pro on prend la TF en mode amplitude c'est good. L'échelle des ordonnées est un peu foirée mais le tout à une constante

Asservissement

Mettre en entrée une tension continue 1 V. Observer que la position de la vis est maintenant asservie (elle ne tourne plus). Appliquer un signal créneau de fréquence 0,5 Hz pour voir la vis passer d'une position à une autre. On montre ainsi que la tension d'entrée commande la position de la vis.

Attention, pour une trop grande tension d'entrée (en valeur absolue) la chaîne de retour ne joue plus son rôle. Le potentiomètre est en effet « à course infinie », c'est-à-dire qu'on peut le tourner indéfiniment contrairement aux potentiomètres habituels. La plage de tension étant restreinte à +5/-5 V, il sautera à -5 V une fois arrivé à +5 V et renverra donc une tension qui ne correspond plus à la véritable position angulaire de la vis. Si cela arrive, la vis se met à tourner indéfiniment.



Etalonnage

↗ Balayer toutes les tensions pour lesquelles la sortie est bien asservie. Tracer l'angle θ en fonction de la tension d'entrée v_e . On obtient une droite. ☺

↓ On a étudié l'asservissement en statique. Que se passe-t-il en dynamique ? Si on change la valeur de consigne, est-ce que la sortie change rapidement ?

2.1 Rapidité

Il y a plusieurs façons de définir un temps de réponse pour l'asservissement. On peut prendre le temps de réponse tr à 5% au bout duquel la valeur est comprise entre 95% et 105% de la valeur de consigne. On peut aussi regarder le temps de montée tm : c'est le temps nécessaire au système pour passer de 10% à 90% de la valeur de consigne. Un bon asservissement devrait a priori avoir des temps de réponse courts.

Temps de réponse

sur une réponse à un échelon, constater en changeant R2 que le temps de montée tm diminue lorsque R2 augmente.

Optimiser R2 pour un asservissement le plus rapide possible nécessite un compromis entre temps de montée et durée du régime transitoire.

Dépassement

Sur les acquisitions précédentes, mesurer le dépassement $D = (v_{max} - v_{\infty})/v_{\infty}$. Tracer D en fonction de R2, on obtient une courbe croissante.

Cette fois il faut augmenter R_2 pour améliorer la rapidité de l'asservissement. Il y a donc un compromis à faire entre précision/ dépassement et temps de réponse.

Conclusion

Nous avons présenté ici les systèmes bouclés à travers les oscillateurs, quasi-sinusoidaux (pont de Wien), et les asservissements. On aurait pu pour ce dernier présenter aussi d'autres types

Nous nous sommes ici principalement occupés de systèmes bouclés électroniques, mais il en existe dans des domaines bien plus large : le vase de Tantale en est un exemple ; on peut aussi penser aux lasers largement utilisés en optique.

Compléments/Questions

Compléments

Oscillateur à quartz

Questions

- Ne pas essayer de tout faire sur les systèmes bouclés, il faut choisir de traiter les système asservis, ou les oscillateurs quasi-sinusoidaux/à relaxation.
- Attention pour les schémas-bloc on sous-entend que l'on a pas de perturbations par exemple.
- Attention une divergence dans l'espace complexe de grandeurs n'implique pas la divergence des grandeurs réelles exemple du Dirac???? Car ce qui passe de $E(t)$ à $E(j\omega)$ c'est la TL alors que la fonction de transfert c'est pas ce qu'on voit dans le réel!! On rappelle que les fonctions propres sont des $\exp(pt)$ et les solutions sont le polynomes caract.
- **Donner des infos sur les contraintes du système**
- A quoi sert le calcul d'erreur sur le facteur de qualité, sachant qu'on s'en sert pas? Pas forcément obligé même si c'est bien d'en faire dans le montage.
- Construction de la leçon à revoir...
- Qu'est ce qui arrive sur la borne + du détecteur de crête? Rétroaction sur le - en réalité. En réalité ça marche pas très bien car l'AO n'est en régime linéaire tout le temps et on a un temps de réponse de l'ordre 1 Hz. Tant qu'on est pas dans des fréquences trop importantes ça va.
- Dans quelle domaine l'AOP est-il linéaire? Il faut une rétroaction stabilisatrice, sinon on est en régime saturé.
- Pourquoi un asservissement en position plutôt que vitesse? Penser qu'il y a aussi un asservissement relatif à la charge qu'on met (couple résistif par exemple) comme dans l'exemple de l'ascenseur.
- Intégrateur, rôle? Permet d'être stable par rapport à la consigne car la valeur naturelle du moteur c'est une tension qui commande une vitesse or on veut comparer à un angle donc (???).
- L'idée du filtre passe bas c'est de se mettre au régime critique pour avoir un dépassement minime et qu'on soit rapide! Si on est sur amorti on est lent et si on est sous amorti on dépasse beaucoup!
- Est-ce qu'on peut regarder les dépassement suivant? Oui pour estimer le facteur de qualité, pour retrouver l'enveloppe exponentielle, on peut avoir plusieurs mesures du dépassement et donc comparer nos mesures de l'amortissement. A quoi on peut comparer l'amortissement? Hum pas grand chose, on peut cependant estimer le facteur de qualité, c'est en gros ici $2Q = 1/2m$.
- 🚫 QUand on écrit le système sous forme de bloc cela suppose que les blocs ne s'influencent pas, on prend tout en compte dedans y compris les charges. Dans le cas contraire on peut pas multiplier les fonctions de transfert. Typiquement pour l'émetteur commun le courant dépend de la charge placée à l'extérieur.
- Si les oscillations ne démarrent pas pour le Quartz, c'est une bonne idée d'augmenter la tension (qq volts ça suffit).
- Pourquoi ça arrête de s'amplifier? Car le gain diminue à partir d'une certaine tension d'entrée. L'idée c'est qu'on reste dans le domaine où $AB=1$. Les non linéarités sont à l'origine de la chute du gain. Par analogie avec le transistor, on peut faire le petit signal tant qu'on reste dans la zone linéaire de la caractéristique $I_c=f(V_{ce})$. Cela se voit notamment dans la saturation de la droite $I_c=\beta I_b$.

- Chariot surprise : déterminer une focale de lentille.